



## بررسی تجربی چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای ورق سه لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم ساخته شده به روش پیوند سرد نوردی

داود رحمت آبادی<sup>1</sup>، بیژن محمدی<sup>2</sup>، رامین هاشمی<sup>3\*</sup>، تقی شجاعی<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 اسفند 1395

پذیرش: 18 فروردین 1396

ارائه در سایت: 11 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

چقرمگی شکست

نورد سرد پیوندی

کامپوزیت لایه‌ای

خواص مکانیکی و میکروسکوپ الکترونی

رویشی

### چکیده

در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های لایه‌ای مورد توجه بسیاری از محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. یکی از روش‌های تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای روش پیوند سرد نوردی می‌باشد که نسبت به سایر روش‌های تولید کامپوزیت از لحاظ اقتصادی به صرفه می‌باشد و قابلیت تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای با جنس‌های مختلف را دارد. در این تحقیق برای اولین بار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای به صورت تجربی برای نمونه‌ی کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از نمونه‌های کششی فشرده و مطابق با استاندارد ASTM E561 مشخص شده است. چقرمگی شکست یکی از پارامترهای مهم ماده در طراحی می‌باشد که بررسی آن به منظور پیش‌بینی عمر و رشد ترک مواد ترک‌دار در برابر اعمال تنش می‌باشد. علاوه بر بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره، میکروسختی و سطح مقطع شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رویشی و میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده حاکی از افزایش استحکام، میکروسختی و چقرمگی شکست برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم 5052 و مس خالص می‌باشد که عامل اصلی این افزایش اعمال کرنش زیاد و کار سرد می‌باشد. چقرمگی شکست برای نمونه‌ی تولید شده به  $38.7 \text{MPa.m}^{1/2}$  می‌رسد که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به ترتیب 81% و 165% افزایش می‌یابد. عکس‌های میکروسکوپ الکترون رویشی نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم همانند نمونه‌های اولیه مشاهده می‌شود، البته با این تفاوت که میکروحفرات برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم عمق‌تر و کوچکتر شده‌اند.

## Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method

Davood Rahmatatabadi, Bijan Mohammadi, Ramin Hashemi\*, Taghi Shojaee

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 March 2017

Accepted 07 April 2017

Available Online 01 May 2017

### Keywords:

Fracture toughness

CARB

Layer composite

Mechanical properties, SEM

### ABSTRACT

In recent years, metallic multilayer materials have been the focus of many researchers and different industries. Cold roll bonding is one of the methods for producing layered composites which, compared to other composite manufacturing methods is more economic and has the ability to produce layered composite with different material. In this research, for the first time and according to ASTM-E561 and using compact tension specimens, plane stress fracture toughness for thin three-layer Al/Cu/Al composite sheets produced by Cold Roll Bonding Process was investigated. The fracture toughness is an important parameter in the design and their analysis can predict crack growth and life for material that has crack. In addition to the fracture toughness, mechanical properties and tensile fracture surfaces were evaluated by using uni-axial tensile test, micro hardness and scanning electron and optic microscopy, respectively. Results showed the value of tensile strength, microhardness and fracture toughness for Al/Cu/Al layered composite compared to initial Al 5052 and pure Cu increased, the main cause of this increase is applied high strain and cold working. Value of fracture toughness for Al/Cu/Al layered composite received  $38.7 \text{MPa.m}^{1/2}$  that compared to initial Al5052 and pure Cu, 81% and 165% enhanced, respectively. Results of SEM demonstrated that ductile fracture mechanism were observed for Al/Cu/Al composite such as initial samples, but the difference is that dimples for composite layers are shallower and smaller compared to initial samples.

### Please cite this article using:

D. Rahmatatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. Shojaee, Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 166-174, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های زمینه فلزی و لایه‌ای به واسطه خواصی مانند استحکام بالا و وزن پایین نسبت به دیگر مواد فلزی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند [1]. این مواد دارای کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف می‌باشند [2]. آلومینیوم با قیمت کم و چگالی پایین در مقایسه با سایر آلیاژهای سبک مانند منیزیم و تیتانیوم بیشترین کاربرد و مصرف را در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارد و به واسطه‌ی خواص آلومینیوم، می‌توان تلفیق مناسبی از استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت به خوردگی را در کامپوزیت‌های زمینه فلزی بدست آورد [3]. همچنین آلیاژهای لایه‌ای و کامپوزیتی آلومینیوم بیشتر در صنایع اتومبیل‌سازی برای کاربردهای انتقال حرارت به دلیل داشتن چندین ویژگی جالب و به صورت همزمان مانند چگالی کم، خواص مکانیکی مطلوب، هدایت حرارتی خوب و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد [4]. هدایت الکتریکی بالا و مقاومت الکتریکی پایین مس سبب شده تا یکی دیگر از فلزات پرکاربرد در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و چندلایه به‌شمار آید. کامپوزیت آلومینیوم-مس به سبب خواص مطلوب دو فلز مس و آلومینیوم می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنایع از جمله هوافضا، خودرو، برق و الکترونیک و متالورژی داشته باشد [5]. همچنین از کامپوزیت‌های آلومینیوم/مس به جای قطعات خاص مسی در سیستم‌های انتقال قدرت در زمانی که وزن و هزینه مد نظر باشد بکار گرفته می‌شود، بنابراین، جوش دو فلز غیر مشابه مس و آلومینیوم می‌تواند موجب طراحی بهینه‌ای برای سیستم‌های انتقال قدرت شود [6].

از بین تکنولوژی‌های موجود، روش پیوند سرد نوردی<sup>1</sup>، یک روش جدید برای تولید مواد و کامپوزیت‌های چندلایه می‌باشد. این روش که در دسته روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک<sup>2</sup> قرار می‌گیرد در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های کاربردی منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک رشد و توسعه سریعی داشته است [4]. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن، عدم محدودیت در ابعاد نمونه و پیوسته بودن فرآیند، عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا، و همچنین قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. فرآیند پیوند سرد نوردی توسط محققین با اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد<sup>3</sup> [7] پیوند به وسیله نورد سرد<sup>4</sup> [8] پوشش به وسیله نورد<sup>5</sup> [9] پیوند سرد نوردی [10] معرفی شده است. پیوند سرد نوردی، نوعی جوشکاری حالت جامد می‌باشد، که پیوند آن بر اثر تغییر شکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات پیوند ایجاد می‌شود. [11]. در این روش پیوند زمانی ایجاد می‌شود که انبساط سطحی در سطوح ورق‌ها ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار باید به اندازه کافی زیاد باشد به طوری که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود که این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [12]. این فرآیند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، که این مواد می‌توانند از یک جنس و یا جنس‌های مختلف باشند، علاوه بر این، فلزاتی را که به وسیله جوش سنتی نمی‌توان به هم جوش زد، می‌توان با این روش بهم اتصال داد [12]. در اوایل سال‌های ابداع این روش، آن‌را به عنوان یک روش امیدبخش برای تولید انبوه ورق و فویل قلمداد می‌کردند [13]. در سال‌های اخیر از فرآیند پیوند سرد پیوندی به‌طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل‌های لایه‌ای بزرگ استفاده شده است [12]. مطالعات بسیاری بر روی

پارامترهای حاکم بر ایجاد پیوند مناسب در پیوند نوردی، به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال در این فرآیند انجام شده است، و شرایط روند اتصال به‌خوبی تعریف شده است. گزارش شده است که پیوند سرد نوردی فلزات متأثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [14]، درجه حرارت اتصال [15]، زمان آنیل قبل و بعد از فرآیند [17,16]، سرعت نورد [18] ضخامت اولیه [18,14]، جهت نورد [14] و حضور ذرات بین ورق [19] می‌باشد، همچنین نورد سرد پیوندی به منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، از قبیل آلومینیوم [12]، فولاد [20]، مس [21]، کامپوزیت آلومینیوم-مس [22]، کامپوزیت آلومینیوم-تیتانیوم [23]، کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم [24].

یکی از پارامترهای مهم مواد در زمینه شکست و طراحی سازه، چقرمگی شکست می‌باشد که عبارت‌است از میزان انرژی مورد نیاز برای توسعه ترک در یک ماده. بررسی و محاسبه چقرمگی شکست به منظور پیش بینی عمر و رشد ترک در قطعات دارای ترک می‌باشد. استحکام شکست در حالت تنش صفحه‌ای علاوه بر اینکه تابع ضخامت است تابع درجه حرارت و نرخ بارگذاری نیز می‌باشد همچنین مقادیر آن می‌تواند با تغییر طول اولیه ترک نیز تغییر نماید. منحنی آر<sup>6</sup> روشی برای تعیین مقاومت شکست مواد در طی رشد آرام و پایدار ترک است. این روش چگونگی افزایش استحکام به شکست را با افزایش بار وارده به نمونه ترک دار طی رشد آرام ترک در حالت تنش صفحه‌ای ترسیم می‌کند. در واقع منحنی آر بیانگر تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب طول ترک است.

در سال‌های اخیر، روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است و هر کدام از این روش‌ها، برای کاربردی شدن، نیازمند بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی بیشتری می‌باشد. به همین منظور، بررسی خواص شکست مانند چقرمگی شکست و مقاومت رشد ترک می‌تواند یکی از پارامترهای موثر باشد. در چند سال اخیر، بررسی چقرمگی شکست برای اکثر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک بیان‌گر اهمیت بررسی این پارامتر برای روش‌های مذکور می‌باشد. البته این بررسی‌ها به صورت محدود و تنها برای حالت‌های خاصی صورت گرفته است. محمدی و همکاران به بررسی چقرمگی شکست نمونه‌های مسی ریزدانه شده به وسیله فرآیند تا کردن و صاف کردن متوالی<sup>7</sup> پرداختند [25]. وارتر و پپین<sup>8</sup> به بررسی و محاسبه چقرمگی شکست نمونه‌ی ریزدانه نیکلی تولید شده به روش تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد<sup>9</sup> پرداختند [26]. سابیرو<sup>10</sup> و همکاران به بررسی چقرمگی شکست تیتانیوم تولید شده به روش تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار<sup>11</sup> پرداختند [27]. دربان و همکاران به بررسی چقرمگی شکست در نمونه‌ی آلومینیوم 7075 تولید شده به روش تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار پرداختند [28]. رحمت‌آبادی و همکاران به بررسی چقرمگی شکست ورق آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی پرداختند [29]. با بررسی تحقیقات پیشین، نتایج قابل تاملی حاصل شد، به طوری که مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌های تولید شده به روش نورد سرد پیوندی و فرآیند تا کردن و صاف کردن متوالی نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش یافت، اما مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌های تولید شده به روش تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد نسبت به نمونه‌های اولیه کاهش

6 R curve

7 Constrained Groove Pressing (CGP)

8 Hohenwarter and Pippan

9 High Pressure Torsion (HPT)

10 Sabirov

11 Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

1 Cold Roll Bonding (CRB)

2 Severe Plastic Deformation (SPD)

3 Cold Pressure Welding by Rolling

4 Bonding by Cold Rolling

5 Clad Sheet by Rolling

نوری و بررسی سطح مقطع شکست به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت که آماده‌سازی نمونه‌ها برای هر آزمون به اختصار توضیح داده می‌شود.

برای مواد اولیه و ورق سه‌لایه تولید شده پس از پیوند سرد نوردی، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به‌وسیله ماشین وایرکات مطابق شکل 2 و استاندارد مربوطه<sup>4</sup> آماده شد. آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  و با استفاده از دستگاه سنتام انجام شد. مقدار ازدیاد طول نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری طول گیج، قبل و بعد از آزمون کشش تعیین شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جنیوس تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمون میکروسختی و میکروسکوپ نوری، جهت تسهیل در جابه‌جایی نمونه‌ها از مانت سرد استفاده شد. پس از مانت نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه پولیش گردان و با استفاده از سنباده‌های 800، 1000 و 1200 برای میکروسختی و سنباده‌های 800 تا 3000 برای بررسی ریزساختار (عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ نوری) پرداخت شد. میکروسختی برای هر نمونه به‌صورت تصادفی در بیش از 10 نقطه مختلف اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد. سطح نمونه‌های شکست، پس از انجام آزمون کشش تک محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین

یافت، و برای نمونه‌های تیتانیوم و آلومینیوم تولید شده به روش تغییر شکل در کانال‌های زاویه‌دار مشابه، به ترتیب کاهش و افزایش چقرمگی شکست حاصل شده است.

در این تحقیق برای اولین بار چقرمگی شکست برای ورق‌های سه‌لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده به‌روش پیوند سرد نوردی به‌صورت تجربی و با استفاده از منحنی آر و نمونه‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. در همه‌ی تحقیقات پیشین، چقرمگی شکست برای نمونه‌های تولید شده تحت فرآیندهای مختلف تغییر شکل شدید پلاستیک از یک جنس بوده و در این تحقیق برای اولین بار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی کامپوزیتی بررسی شده است. علاوه بر بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی، سطح مقطع شکست و ریزساختار نمونه‌ی کامپوزیتی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوره<sup>1</sup>، میکروسختی ویکرز، عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> و میکروسکوپ نوری<sup>3</sup> مورد بررسی قرار گرفت.

## 2- روش تحقیق

خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این پژوهش (آلومینیوم 5052 با ضخامت 1 میلی‌متر و مس خالص تجاری با ضخامت 1 میلی‌متر) با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوره، میکروسختی محاسبه شده و در جدول 1 ارائه شده است.

### 1-2- فرآیند پیوند سرد نوردی

به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریز ساختاری و چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای، ورق سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص تجاری) در ابعاد 120 میلی‌متر طول و 50 میلی‌متر عرض بریده شد. شماتیک فرآیند پیوند سرد نوردی در شکل 1 نشان داده شده است. بر این اساس ابتدا دو قطعه از ورق اولیه آلومینیومی و یک ورق مسی با استفاده از آب و صابون شسته شده و سپس در حمام استون چربی زدایی می‌شود و پیش از عملیات چربی‌زدایی، توسط برس فولادی سطوحی که در تماس با یکدیگر هستند، خراشیده و زبر می‌شوند و سپس سه ورق به صورتی که لایه‌های خارجی را آلومینیوم آلیاژی 5052 و لایه دورنی را مس خالص تجاری تشکیل دهد روی هم قرار داده شد. البته به منظور جلوگیری از لغزش آن‌ها بر روی هم، نمونه‌ها را از چهار طرف سوراخ کرده و توسط سیم مسی بهم محکم بسته می‌شوند و سپس پیوند نوردی با 50% کاهش ضخامت برقرار شد. توجه شود که به منظور جلوگیری از اکسیدشدن لایه‌های سطحی، زمان بین آماده‌سازی سطوح و عملیات نورد نباید بیشتر از 150 ثانیه باشد [30]. در مرحله بعد ورق‌های روی هم گذاشته شده و پیوند نوردی با قطر غلطک‌های 110 میلی‌متر و در دمای اتاق نورد شده و پیوند مورد نظر بین لایه‌های در تماس (مس و آلومینیوم) ایجاد می‌شود.

### 2-2- بررسی خواص مکانیکی و شکست

در این تحقیق پس از ساخت ورق سه‌لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم و علاوه بر آزمون شکست و بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی به‌وسیله آزمون کشش تک‌محوره و میکروسختی، بررسی ریزساختار به‌وسیله میکروسکوپ

Table 1 Mechanical properties of commercial purity Copper and AA5052 Aluminum alloy

جدول 1 خواص مکانیکی مس خالص تجاری و آلومینیوم آلیاژی 5052		
ماده	استحکام کششی (MPa)	میکروسختی (HV)
آلومینیوم آلیاژی 5052	281	92
مس خالص تجاری	173	74

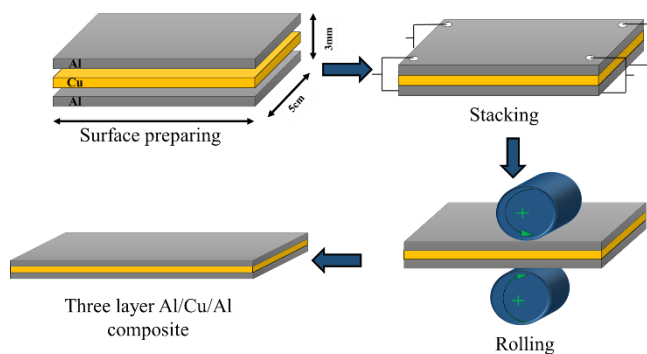


Fig.1 Schematic illustration of CRB process

شکل 1 شماتیک فرآیند نورد سرد پیوندی

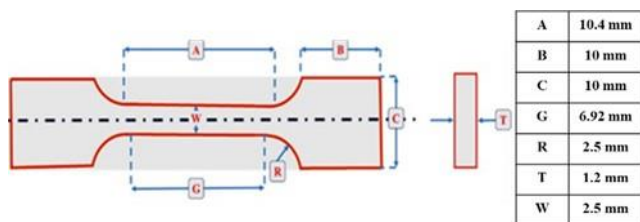


Fig.2 Dimensions of tensile test specimens used according to JIS Z2201

شکل 2 ابعاد نمونه‌های آزمون کشش استفاده شده براساس استاندارد JIS Z2201

<sup>4</sup>JIS Z2201

<sup>1</sup> Uni-axial tensile test

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

<sup>3</sup> Optic Microscopy (OM)

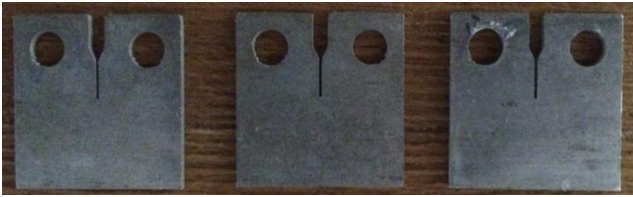


Fig.4 CT specimens before fracture test

شکل 4 نمونه‌های کششی فشرده قبل از آزمون شکست

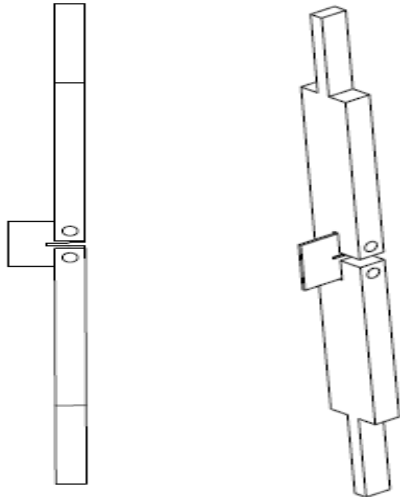


Fig.5 Schematic of how to place fixture and CT specimens

شکل 5 شماتیک نحوه قرار گرفتن قید و بند و نمونه‌های CT



Fig.6 Fixtures made for fracture test

شکل 6 قید و بند ساخته شده برای آزمایش شکست

### 3- نتایج و بحث

#### 1-3- شکست‌نگاری و ریزساختار

در شکل‌های 9 و 10 سطح مقطع شکست ورق‌های آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص تجاری (قبل از فرآیند نورد سرد پیوندی) پس از انجام آزمون کشش تک‌محوره نشان داده شده است. مکانیزم غالب شکست فلزات دارای

مکانیزم شکست در سیکل‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مدل وگاتسکان<sup>1</sup> مورد بررسی قرار گرفت.

#### 2-3- آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای

به منظور بررسی چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص تجاری) و ورق سه‌لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با استفاده از فرآیند نورد سرد پیوندی، از هر ورق، سه نمونه مشابه به منظور تکرار پذیری، برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد که مطابق با استاندارد ای 647<sup>2</sup>، نمونه‌های کششی فشرده<sup>3</sup> با استفاده از ماشین وایرکات آماده شد. در ابتدا نمونه‌ها بر اساس نقشه موجود در شکل 3 و مطابق با شکل 4 و در ابعاد  $23.75 \times 22.8 \times 1.5$  میلی‌متر در راستای عمود بر جهت نورد بریده شدند، سپس در این نمونه‌ها یک شیار نازک با عرض 1 و طول حدود 8 میلی‌متر به وسیله ماشین وایرکات ایجاد شد. همچنین این شیار به یک ناچ وی شکل با زاویه 60 درجه ختم می‌شود و پس از آن به اندازه 1 میلی‌متر و عرض 0.25 میلی‌متر گسترش یافت. این شیار با استفاده از ماشین وایرکات با قطر سیم 0.2 میلی‌متر ایجاد شد. این تکنیک ایجاد و گسترش ترک اولین بار توسط موراد [31] و پس از آن توسط محمدی [25] استفاده شد. نسبت  $a_0/w = 0.4$  یکسان برای همه نمونه‌ها ایجاد شد. قید و بند و بین‌هایی که در آزمایش از آن‌ها استفاده شده و نمونه به کمک آن‌ها نگه داشته شدند، باید صلب بوده و به‌گونه‌ای باشند که در حین بارگذاری، تغییر شکل آن‌ها خطایی در آزمایش ایجاد نکند. همچنین نباید در حین آزمایش، امکان پیچیدن نمونه و خارج شدن از راستای بارگذاری را داشته باشند. قید و بند بر طبق استاندارد ای 399<sup>4</sup> برای نمونه‌های کششی فشرده، انتخاب طراحی و ساخته شدند. شکل‌های 5 و 6 شماتیک نحوه قرار گرفتن نمونه‌های کششی فشرده و قید و بند ساخته شده را نشان می‌دهد. توجه شود که نمونه‌های آماده شده برای بدست آوردن چقرمگی شکست در مود اول می‌باشد. همه نمونه‌ها تحت کنترل جابه‌جایی، تحت بارگذاری شبه استاتیکی، با سرعت 0.5 mm/min و با استفاده از دستگاه سنتام در دمای محیط انجام شد. شکل 7 مجموعه آزمایش چقرمگی شکست را نشان می‌دهد. در شکل 8 نحوه قرار گرفتن پین و نمونه قبل از انجام آزمایش مشاهده می‌شود.

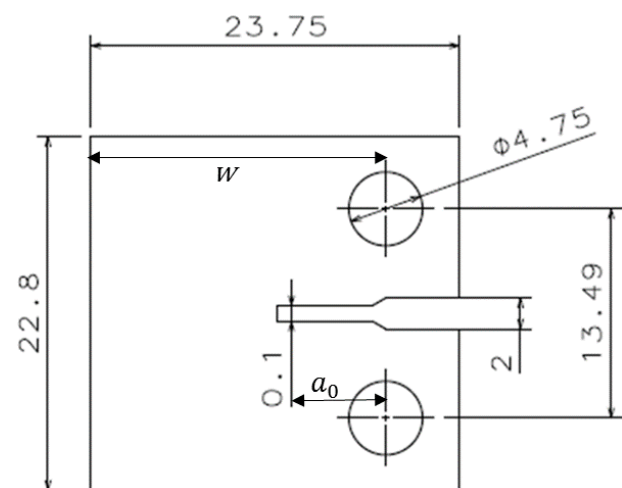


Fig.3 Map and dimensions of CT specimens

شکل 3 نقشه و ابعاد نمونه‌های کششی فشرده

<sup>1</sup> VEGA TESCAN

<sup>2</sup> ASTM E647

<sup>3</sup> Ct sample

<sup>4</sup> ASTM E-399

کاهش یافته است که دلیل اصلی این قضیه، اعمال کار سرد، کرنش زیاد و نهایتاً افزایش چگالی نابه‌جایی می‌باشد. با توجه به نمودار تنش-کرنش که بیانگر کاهش شکل‌پذیری و افزایش استحکام می‌باشد، می‌توان گفت که سطح مقطع شکست نیز تأییدکننده این نتایج بوده و بیانگر این است که با اعمال کار سرد، استحکام افزایش یافته و از شکل‌پذیری آن نسبت به نمونه‌ی اولیه کاسته شده است. همچنین با توجه به شکل 11 پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و مس برقرار شده است و انفصال و جدایش در سطح تماس لایه‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوره که بیانگر استحکام بالای کامپوزیت آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با روش پیوند سرد نوردی می‌باشد، ثابت‌کننده این موضوع می‌باشد که پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و مس برقرار شده است و انفصالی در بین لایه‌ها مشاهده نمی‌شود. با توجه به تصاویر سطح مقطع شکست از نمونه‌های اولیه و کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به طور خلاصه می‌توان گفت که عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی در شکل‌های 9-11 نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم همانند نمونه‌های اولیه حاکم است، البته با این تفاوت که میکروحفرات برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم‌عمق‌تر و کوچک‌تر شده‌اند، که دلیل آن کار سرد و اعمال کاهش ضخامت بالا می‌باشد.

در شکل 12، تصویر میکروسکوپ نوری ارائه شده است. در این شکل ریزساختار و ترتیب اتصال ورق‌های آلومینیوم و مس در کامپوزیت لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با روش نورد سرد پیوندی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل 12 نیز پیوند مناسب بین لایه‌ها ایجاد شده و انفصال و جدایش در بین لایه‌ها مشاهده نمی‌شود.

### 3-2- خواص مکانیکی

شکل 13 نمودار تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت Al/Cu فرآوری شده

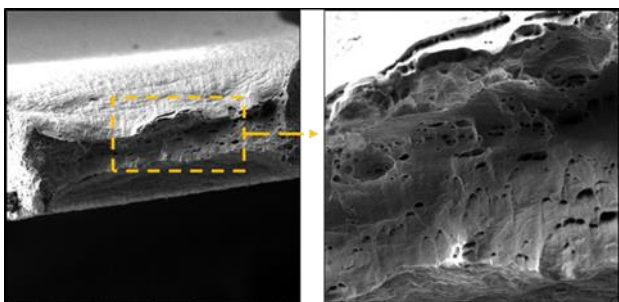


Fig.9 Tensile fracture surfaces of commercial purity Copper  
شکل 9 سطح مقطع مس خالص تجاری

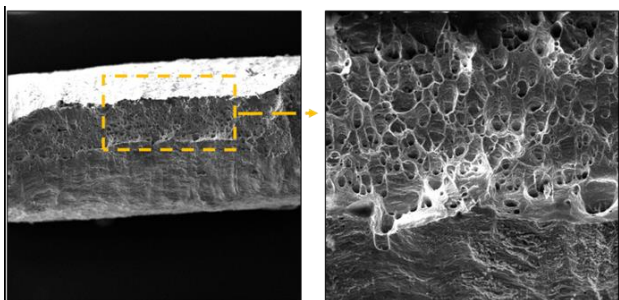


Fig.10 Tensile fracture surfaces of AA5052 Aluminum alloy  
شکل 10 سطح مقطع شکست آلومینیوم آلیاژی 5052

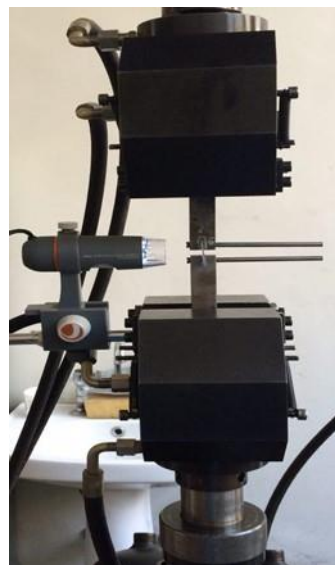


Fig.7 Experimental set-up

شکل 7 مجموعه آزمایش چقرمگی شکست

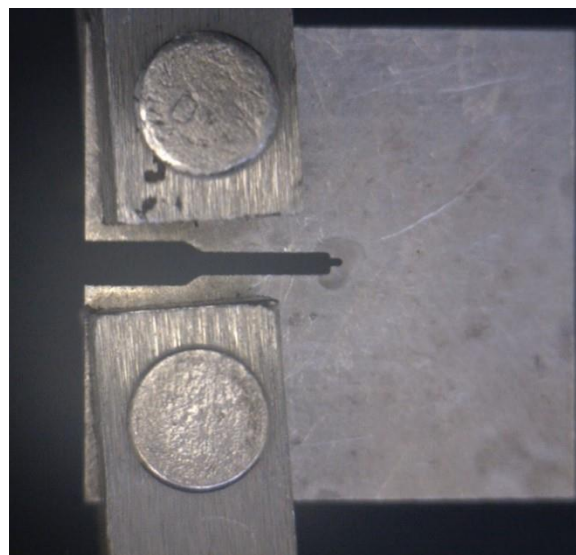


Fig.8 Fixtures and sample before fracture test

شکل 8 قید و بند و نمونه قبل از آزمون شکست

ساختار کریستالی مکعبی وجوه مرکز پر، ایجاد حفره<sup>1</sup> و شکست نرم<sup>2</sup> می‌باشد. از مشخصات شکست نرم تحت تاثیر تنش کششی، ظاهر گشتن گلوبی<sup>3</sup> و ایجاد حفره‌های بسیار ریز در درون قسمت گلوبی و اتصال آن‌ها به یکدیگر تا رسیدن به حد یک ترک ریز و رشد آرام ترک تا حد پارگی یا شکست نهایی است [32]. در شکل 11، سطح مقطع شکست نمونه‌ی کامپوزیتی و سه‌لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم پس از آزمون کشش تک‌محوره مشاهده می‌شود. همچنین در این شکل، تصاویر برای هر دو لایه آلومینیوم و مسی، به صورت مجزا و با بزرگنمایی بیشتر نمایش داده شده است.

در شکل 11 (لایه‌های آلومینیوم و مس بعد از نورد سرد پیوندی)، واضح است که نسبت به شکل‌های 9 و 10 (نمونه‌های اولیه و قبل از فرآیند نورد سرد پیوندی)، دارای حفرات کمتر می‌باشد و همچنین عمق حفرات نیز

<sup>1</sup> dimple  
<sup>2</sup> ductile fracture  
<sup>3</sup> necking

مقایسه دو لایه میکروسختی ویکرز انجام شده است. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نیز این امر را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که مقدار سختی برای هر دو لایه آلومینیوم و مس در کامپوزیت تولید شده، نسبت به نمونه‌های اولیه خودشان به شدت افزایش می‌یابد و به ترتیب برای آلومینیوم و مس، از مقادیر 74.3 و 92 به 136 و 103 می‌رسد. از علل افزایش میکروسختی می‌توان به کار سرد، اعمال کرنش زیاد و افزایش چگالی نابه‌جایی اشاره کرد که در کارهای مشابه قبلی نیز ذکر شده‌اند و از عوامل موثر در افزایش سختی بوده‌اند [33,30].

با توجه به شکل 14 که نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه سختی برای هر دو لایه آلومینیوم و مس بعد از نورد و در کامپوزیت تولید شده نسبت به قبل از نورد افزایش یافته است، مشاهده می‌شود که مقدار میکروسختی لایه‌ی مسی در کامپوزیت تولید شده نسبت به لایه‌ی آلومینیومی افزایش بیشتری داشته است، به طوری که نرخ افزایش میکروسختی برای مس 82.5% و برای آلومینیوم 12.1% می‌باشد. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی برای نمونه‌های آلومینیوم و مس را می‌توان اختلاف در انرژی نقش در چینش دو ورق اولیه دانست.

### 3-3- چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای

پس از انجام آزمایش چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای، باید طول ترک به صورت پیوسته و در نیروهای مختلف اندازه‌گیری شود. طبق استاندارد

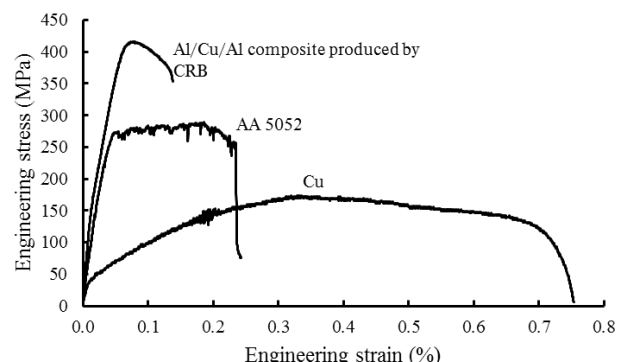


Fig.13 Engineering stress-strain curves of initial samples and Al/Cu/Al composite produced by CRB process

شکل 13 منحنی تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌های اولیه و کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

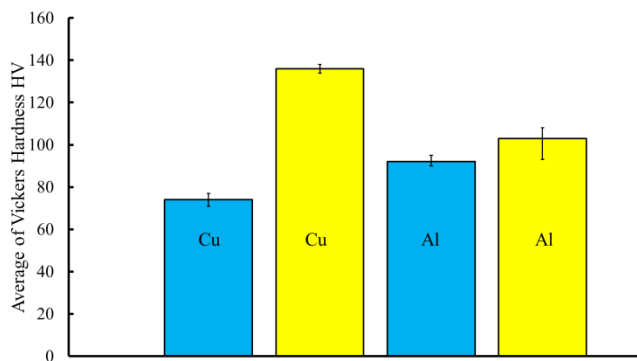


Fig. 14 Microhardness variations Al and Cu strips before and after CRB process

شکل 14 تغییرات میکروسختی برای لایه‌های آلومینیوم و مس قبل و بعد از فرآیند نورد سرد پیوندی

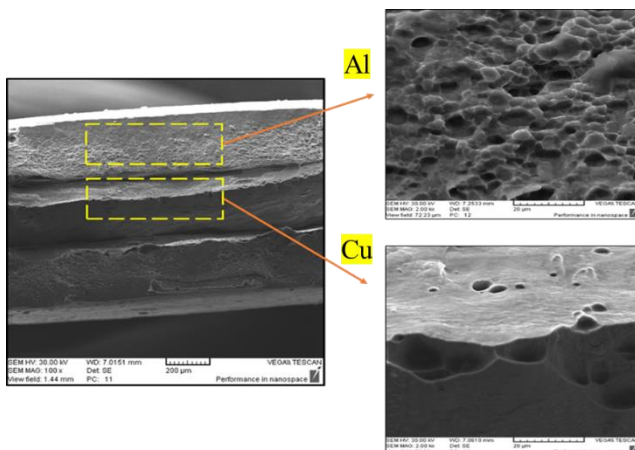


Fig.11 Tensile fracture surfaces of Al/Cu/Al composite produced by CRB process

شکل 11 سطح مقطع شکست کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با استفاده از فرآیند نورد سرد پیوندی

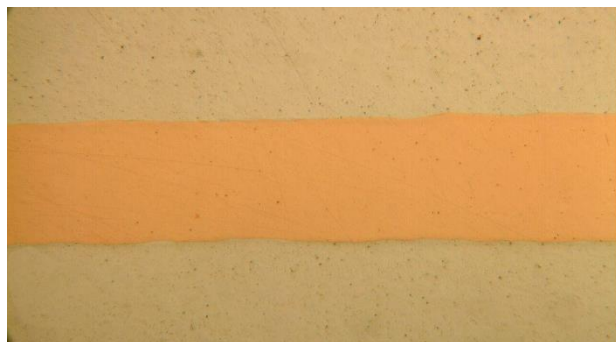


Fig.12 Microstructure of Al/Cu/Al composite produced by CRB process

شکل 12 ریزساختار کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی

با استفاده از روش پیوند سرد نوردی و نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کامپوزیت تولید شده، استحکام کششی بیشتری نسبت به ورق‌های اولیه دارد و استحکام کششی آن به مقدار 414.5 مگاپاسکال می‌رسد که مطابق با جدول 2 نسبت به ورق‌های مس و آلومینیوم اولیه به ترتیب 140% و 48% افزایش یافته است. البته مقدار ازدیاد طول برای نمونه‌ی کامپوزیتی تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه کاهش یافته است و با توجه به اعمال کرنش زیاد (کاهش ضخامت 60%) و انجام کار سرد (نورد در دمای اتاق) افزایش استحکام کشش و کاهش ازدیاد طول، کاملاً منطقی و قابل پیش‌بینی می‌باشد. البته به دلیل شکل‌پذیری زیاد مس اولیه، مقدار ازدیاد طول نمونه‌ی تولید شده نسبت به تحقیقات پیشین مطلوب می‌باشد. همچنین تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز روند تغییرات در خواص مکانیکی بدست آمده را تایید می‌کند [33].

علاوه بر آزمون کشش تک‌محوره، مطابق با شکل 14 مقدار میکروسختی ویکرز برای نمونه‌های اولیه و لایه‌های آلومینیوم و مس کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی و به صورت مجزا محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. افزایش میزان میکروسختی به دلیل اعمال کار سرد و افزایش کرنش سختی برای هر دو لایه‌ی آلومینیوم و مس در کامپوزیت تولید شده قابل پیش‌بینی می‌باشد ولی به دلیل بدست آوردن مقدار میکروسختی، درصد افزایش و



Fig.15 CT specimens after fracture test and crack growth path

شکل 15 نمونه‌های کششی فشرده بعد از آزمون شکست و مسیر رشد ترک

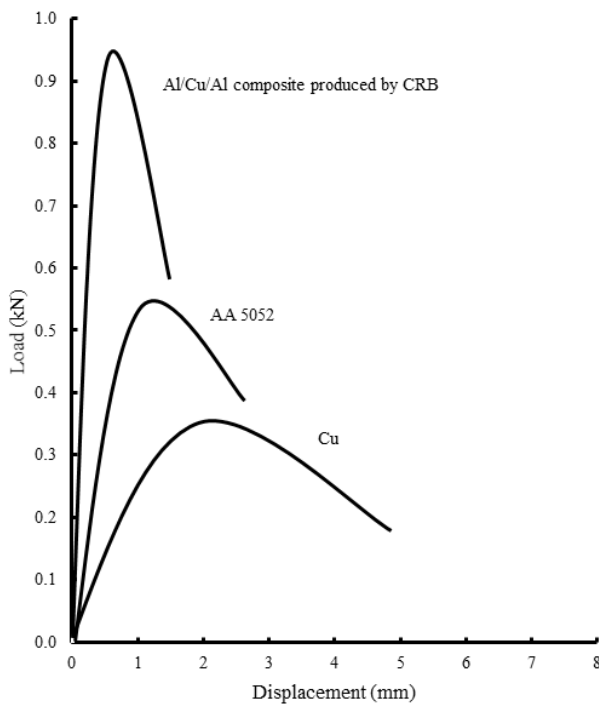


Fig.16 Load-displacement curve in the fracture test of initial sample and Al/Cu/Al composite produced by CRB

شکل 16 نمودار نیرو-جاب‌جایی در آزمون شکست برای نمونه‌ی اولیه و دو لایه تولید شده به روش نورد سرد پیوندی

ترسیم شده است. مطابق با شکل 17 نقاط تماس بین منحنی‌های آر و خطوط خط‌چین، مقادیر فاکتور شدت تنش بحرانی در طول ترک مورد نظر می‌باشد. این بدان معناست که در لحظه‌ای که سطح فاکتور شدت تنش در قطعه، برابر میزان مقاومت شکست ماده می‌شود رشد ترک به صورت ناپایدار آغاز می‌گردد. همان‌طور که از شکل 17 نیز مشاهده می‌شود، در یک جز افزایش بعد از نقطه تماس، مقدار فاکتور شدت تنش اعمال شده از مقاومت

ای 647<sup>1</sup> دو روش برای اندازه‌گیری طول ترک در حین انجام آزمایش وجود دارد:

- روش بصری
- روش اختلاف پتانسیل الکتریکی

که در این پژوهش، اندازه‌گیری رشد ترک به صورت بصری و با استفاده از میکروسکوپ مدل سلسترون<sup>2</sup> انجام شده است.

در این پژوهش مطابق با استاندارد ای 561<sup>3</sup> و به منظور محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای نمونه‌ها از منحنی آر استفاده شد. در روش منحنی آر، در یک طول ترک، تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب تغییر طول ترک ترسیم می‌شود و مقاومت به رشد ترک با افزایش نیرو و طول ترک افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات فاکتور شدت تنش اعمال شده<sup>4</sup> بر حسب تغییرات طول ترک در سه سطح مختلف از نیروهای ثابت نیز به وسیله خط‌چین ترسیم می‌شود. در تحقیق حاضر نیز از این روش برای محاسبه چقرمگی شکست استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد، چقرمگی شکست از محل تماس دو نمودار مقاومت به رشد ترک و فاکتور شدت تنش اعمال شده محاسبه می‌شود. مقدار مقاومت به رشد ترک با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود. همچنین مقدار فاکتور شدت تنش اعمال شده در چند نیروی ثابت در سطوح مختلف و بر حسب تغییرات طول ترک ترسیم می‌شود. محل تماس بین منحنی‌های فاکتور شدت تنش اعمال شده و رشد ترک و شدت تنش اعمال شده، چقرمگی شکست یا فاکتور شدت تنش بحرانی برای نمونه‌ی مورد نظر می‌باشد.

$$k_{r_i} = \frac{p_i}{b\sqrt{w}} \times f_i \left( \frac{a}{w} \right)$$

$$f_i \left( \frac{a}{w} \right) = \left[ \frac{2 + \frac{a}{w}}{\left( 1 - \frac{a}{w} \right)^{\frac{3}{2}}} \right] \left[ 0.886 + 4.64 \left( \frac{a}{w} \right) - 13.32 \left( \frac{a}{w} \right)^2 + 14.72 \left( \frac{a}{w} \right)^3 - 5.6 \left( \frac{a}{w} \right)^4 \right]$$

رابطه بالا برای  $\frac{a}{w} \geq 0.35$  صادق می‌باشد.

در شکل 15 نمونه‌ی تغییر شکل یافته‌ی کامپوزیتی و سه‌لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم، پس از آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای ارائه شده است. همچنین در این شکل مشخص است که رشد ترک در یک مسیر مستقیم و در راستای همان ترک اولیه می‌باشد.

شکل 16، نمودار نیرو-جاب‌جایی را برای نمونه‌های اولیه و سه لایه کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی نشان می‌دهد. جاب‌جایی نمودار، جاب‌جایی دهانه ترک در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل واضح است که نیروی گسترش ترک با افزایش رشد ترک و تا نقطه بیشترین مقدار نیرو، برای هر سه نمونه افزایش می‌یابد و این افزایش به صورت خطی می‌باشد همچنین نیروی گسترش ترک برای نمونه سه لایه کامپوزیتی به مراتب بیشتر از نمونه‌های اولیه شده است. مقدار نیروی بیشینه با استفاده از شکل 16 به دست می‌آید و مقادیر آن در جدول 2 ارائه شده است. نیروی رشد ترک بیشینه برای نمونه‌ی سه‌لایه در مقایسه با نمونه‌های اولیه بیش از دو برابر می‌باشد.

چقرمگی شکست برای هر نمونه با استفاده از معادلات بالا و بر اساس استاندارد ای 561<sup>3</sup> محاسبه شد. نمودار آر برای نمونه‌های سه لایه کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، در شکل 17

<sup>1</sup> ASTM E-647

<sup>2</sup> Celestron

<sup>3</sup> ASTM E561

<sup>4</sup> Kapplied

از کامپوزیت‌های تولید شده با این روش به‌عنوان جایگزین مناسب برای مواد پر هزینه در ساخت و تولید مانند آلیاژهای تیتانیومی در صنایع مختلف مانند هوا فضا، صنایع نظامی و غیره استفاده شود.

#### 4- نتایج

در این تحقیق، نمونه‌ی کامپوزیتی و سه لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی تولید شد و خواص مکانیکی، شکست نگاری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق، برای اولین بار، چقرمگی شکست تنش صفحه‌ی تحت بارگذاری در مود اول و برای مواد کامپوزیت لایه‌ای و کاربردی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی بر اساس استاندارد کششی فشرده که با استفاده از ماشین وایرکات آماده شد، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

1- کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی با اعمال کاهش ضخامت 60% تولید شد. همچنین با توجه به تصویر میکروسکوپ نوری ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و پیوند مناسب بین لایه‌ها ایجاد شد.

2- خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده به مراتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده می‌باشد به طوری که مقادیر استحکام کششی و میکروسختی ویکرز افزایش می‌یابد و استحکام کششی 415 مگاپاسکال حاصل می‌شود و البته مقدار ازدیاد طول کاهش یافته است. مقدار استحکام کششی برای کامپوزیت آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده نسبت به مقادیر استحکام کششی برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به ترتیب 48% و 140% افزایش یافته است.

3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم همانند نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس

ماده بیشتر می‌شود که مبین رشد ناپایدار ترک است. نمودار مشکی رنگ، نمودار آر و نمودارهای خط چین، نمودار فاکتور شدت تنش اعمال شده در نیروهای مختلف و ثابت می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ذکر شده مشخص است، مقدار چقرمگی شکست برای هر نمونه از تماس بین منحنی آر و شدت تنش اعمال شده در نیروی ثابت بدست می‌آید. براساس جدول 2 که در آن نتایج حاصل از محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای نیز مشخص است مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس و نمونه‌ی کامپوزیتی سه‌لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به ترتیب 21.3 و 14.6 و 38.7 می‌باشد که بیانگر بهبود مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس و به میزان 81% و 165% می‌باشد. همان‌طور که مشخص است اعمال کار سرد و متعاقباً افزایش در مقدار استحکام و سختی می‌تواند یکی از دلایل افزایش چقرمگی شکست برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم در مقایسه با نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس باشد.

پارامتر چقرمگی شکست برای نمونه‌هایی با هندسه‌ی مشابه می‌تواند تحت تاثیر استحکام و چقرمگی (شکل پذیری) باشد. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که در فرآیند پیوند سرد نوردی، به دلیل اعمال کار سرد و کرنش زیاد، استحکام افزایش می‌یابد و مقدار شکل دهی کاهش یافته است، اما نتایج چقرمگی شکست حاکی از بهبود چقرمگی شکست تا حدود 2-3 برابر نمونه‌های اولیه می‌باشد که این کار می‌تواند به سبب وجود مس خالص با چقرمگی بسیار بالا و ایجاد ترکیب مناسب آن با آلومینیوم آلیاژی 5052 باشد. البته همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد، افزایش استحکام در حین فرآیند نیز از دلایل دیگر افزایش چقرمگی شکست می‌باشد ولی این پارامتر به تنهایی نمی‌تواند موجب افزایش 2-3 برابری چقرمگی شکست شود، زیرا در تحقیقات پیشین برای مواد تولید شده با روش‌های مختلف تغییر شکل شدید پلاستیک، روند و نرخ افزایش استحکام حتی بیشتر از تحقیق حاضر بوده است، ولی به دلیل افزایش استحکام و کاهش بیش از حد چقرمگی، باعث کاهش چقرمگی شکست یا افزایش ناچیز آن نسبت به نمونه‌های اولیه شده است [25-28].

بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان گفت که بنابر تحقیقات پیشین و نتایج کار حاضر می‌توان گفت که تولید کامپوزیت در فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک و استفاده از مواد با چقرمگی بالا در کنار مواد با استحکام مناسب می‌تواند منجر به دستیابی به ترکیب خوبی از خواص مواد اولیه شود و مانند تحقیق حاضر و طبق جدول 2، شاهد بهبود چشم‌گیر در استحکام، سختی و چقرمگی شکست باشیم.

با استفاده از روش ساده و کم هزینه فرآیند پیوند سرد نوردی و همچنین استفاده از مواد مناسب می‌توان کامپوزیت‌هایی با خواص بسیار مطلوب در چقرمگی شکست، خواص مکانیکی، و نسبت استحکام به وزن بالا تولید کرد و

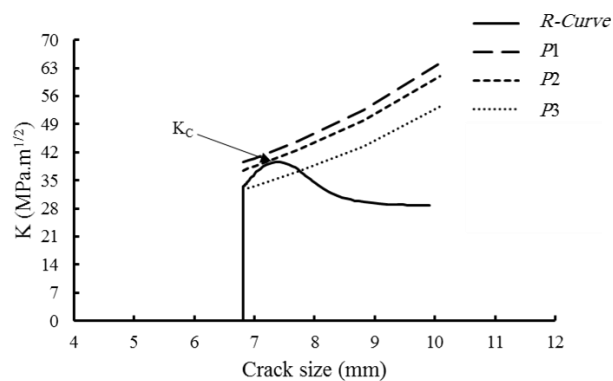


Fig.17 R curve for Al/Cu/Al composite

شکل 17 منحنی آر برای کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی

Table 2 Results of mechanical properties and fracture tests

ماده	چقرمگی شکست (مگاپاسکال متر <sup>0.5</sup> )	نیروی بیشینه (کیلو نیوتن)	استحکام کششی (مگاپاسکال)
آلومینیوم آلیاژی 5052	21.3	552	281
مس خالص تجاری	14.6	368	178
کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با روش پیوند نوردی	38.7	941	415

جدول 2 نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی و شکست



- [9] A. Yahiro, T. Masui, T. Yoshida, D. Doi, Development of nonferrous clad plate and sheet by warm rolling with different temperature of materials, *ISIJ International*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-654, 1991.
- [10] H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, Cold roll bonding of 5754-aluminum strips, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002.
- [11] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip, *Materials Science And Technology*, Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, 2004.
- [12] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.
- [13] N. Karakazov, *Diffusion bonding of metals*, Chapter 1 and 8; London, Pergamon Press Oxford, 1985.
- [14] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2320-2326, 2010.
- [15] M. Eizadjou, H. D. Manesh, K. Janghorban, Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008.
- [16] H. D. Manesh, A. K. Taheri, The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet, *Materials & Design*, Vol. 24, No. 8, pp. 617-622, 2003.
- [17] M. Movahedi, H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 487, No. 1, pp. 417-423, 2008.
- [18] M. Abbasi, M. R. Toroghinejad, Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 3, pp. 560-563, 2010.
- [19] M. Alizadeh, M. Paydar, Study on the effect of presence of TiH<sub>2</sub> 2 particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-86, 2009.
- [20] N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Tanigawa, Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 795-800, 1999.
- [21] M. Shaarraf, M. R. Toroghinejad, Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1, pp. 28-33, 2008.
- [22] M. Eizadjou, A. K. Talachi, H. D. Manesh, H. S. Shahabi, K. Janghorban, Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2003-2009, 2008.
- [23] D. Yang, P. Cizek, P. Hodgson, C. e. Wen, Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding, *Scripta Materialia*, Vol. 62, No. 5, pp. 321-324, 2010.
- [24] K. Wu, H. Chang, E. Maawad, W. Gan, H. Brokmeier, M. Zheng, Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 13, pp. 3073-3078, 2010.
- [25] B. Mohammadi, M. Tavoli, F. Djevanroodi, Effects of Constrained Groove Pressing (CGP) on the plane stress fracture toughness of pure copper, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 52, No. 5, pp. 957-969, 2014.
- [26] A. Hohenwarter, R. Pippin, Fracture toughness evaluation of ultrafine-grained nickel, *Scripta Materialia*, Vol. 64, No. 10, pp. 982-985, 2011.
- [27] I. Sabirov, R. Z. Valiev, I. P. Semenova, R. Pippin, Effect of Equal Channel Angular Pressing on the Fracture Behavior of Commercially Pure Titanium, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 41, No. 3, pp. 727-733, 2010.
- [28] H. Darban, B. Mohammadi, F. Djevanroodi, Effect of equal channel angular pressing on fracture toughness of Al-7075, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 65, pp. 1-10, 2016.
- [29] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of plane stress fracture toughness for two layers of aluminum sheets produced by cold roll bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 101-108, 2017. (in Persian)
- [30] R. Jamaati, M. Toroghinejad, Cold roll bonding bond strengths: review, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
- [31] A. Mourad, M. Alghafri, O. A. Zeid, S. Maiti, Experimental investigation on ductile stable crack growth emanating from wire-cut notch in AISI 4340 steel, *Nuclear engineering and design*, Vol. 235, No. 6, pp. 637-647, 2005.
- [32] A. Pineau, A. A. Benzerga, T. Pardoen, Failure of metals III. Fracture and fatigue of nanostructured metallic materials, *Acta Materialia*, pp. 508-544, 2015.
- [33] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016. (in Persian)

خالص) برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم نیز حاکم است، البته با این تفاوت که میکروحفرات برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم عمق‌تر و کوچکتر شده‌اند، که اعمال کرنش زیاد و کار سرد باعث کاهش تعداد و کم عمق شدن دیمل‌های موجود در لایه‌های کامپوزیت تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه شده است و این تغییرات حاکی از افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری می‌باشد که نتایج تحقیقات گذشته و نمودار تنش-کرنش نیز تایید کننده این موضوع می‌باشد.

4- مقدار میکروسختی ویکرز برای لایه‌های آلومینیوم و مس بعد از فرآیند نسبت به قبل از فرآیند به ترتیب 12.1% و 82.5% افزایش یافته است که کارسرد و افزایش کرنش سختی دلایل اصلی این افزایش می‌باشد.

5- مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی کامپوزیتی به مراتب بالاتر از مواد اولیه استفاده شده در این تحقیق می‌باشد که مقدار آن برای نمونه‌ی سه‌لایه کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی 38.7 می‌باشد و در مقایسه با نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به ترتیب حدود 81% و 165% افزایش یافته است. علاوه بر اعمال کار سرد و افزایش استحکام، وجود مس با چقرمگی بالا در کامپوزیت تولید شده، یکی دیگر از دلایل مهم این افزایش در مقدار چقرمگی شکست می‌باشد.

## 5- فهرست علائم

$a_0$	طول ترک اولیه (mm)
$B$	ضخامت (mm)
$k_r$	مقاومت به رشد ترک ( $\text{MPam}^{1/2}$ )
$w$	عرض (mm)

## 6- مراجع

- [1] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, A. Najafizadeh, An alternative method of processing MMCs by CAR process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 10, pp. 2720-2724, 2010.
- [2] D. Lee, B. Kim, Nanostructured Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite produced by thermochemical process for electrode application, *Materials Letters*, Vol. 58, No. 3, pp. 378-383, 2004.
- [3] I. Estrada-Guel, C. Carreño-Gallardo, D. Mendoza-Ruiz, M. Miki-Yoshida, E. Rocha-Rangel, R. Martínez-Sánchez, Graphite nanoparticle dispersion in 7075 aluminum alloy by means of mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483, No. 1, pp. 173-177, 2009.
- [4] L. Li, K. Nagai, F. Yin, Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, volume 9, issue 2, 2008.
- [5] J. Lee, D. Bae, W. Chung, K. Kim, J. Lee, Y. Cho, Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, pp. 546-549, 2007.
- [6] J. Ouyang, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic, Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, pp. 110-122, 2006.
- [7] D. Milner, L. Vaidyanath, Significance of surface preparation in cold pressure welding, *British welding Journal*, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.
- [8] J. Yong, P. Dashu, L. Dong, L. Luoxing, Analysis of clad sheet bonding by cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 32-37, 2000.